$$Q_G(t) = \begin{bmatrix} 0 & r_G & -q_G \\ -r_G & 0 & p_G \\ q_G & -p_G & 0 \end{bmatrix}$$

$$p_G = (\omega_s + \phi) \cos \lambda, q_G = -\lambda$$

$$r_G = -(\omega_s + \phi) \sin \lambda$$

したがって

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t_0; 0) = & \{Q_G(t_0)C(t_0) + C(t_0)Q_B^T(t_0)\}\eta(t_0) \\ & + C(t_0)\dot{\eta}(t_0) \end{aligned} \quad (28)$$

以上の結果をまとめると

$$\begin{aligned} \xi(t_0; 0) = & (\Delta t)C(t_0)\eta(t_0) \\ & + \frac{1}{2}(\Delta t)^2\{Q_G(t_0)C(t_0)\eta(t_0) \\ & + C(t_0)Q_B^T(t_0)\eta(t_0) + C(t_0)\dot{\eta}(t_0)\} \end{aligned} \quad (29)$$

(29)式において第2項以下は、いわば補正項であり、精密な値が必要な場合に有効と思われる。

さて(29)式の値を求めるには $C(t_0)$, $Q_B(t_0)$, $Q_G(t_0)$, $\eta(t_0)$, $\dot{\eta}(t_0)$ の値が必要である。 $C(t_0)$ については姿勢計算の結果から計算される。 $Q_B(t_0)$ は(17)式で述べたレート積分ジャイロの出力 δ_1, δ_2 より計算され、 $Q_G(t_0)$ は p_G, q_G, r_G より求められる。 $\eta(t_0), \dot{\eta}(t_0)$ については次に述べる方法により計算する。

時刻 t_0 から $t_0 + \Delta t$ の間の加速度計の出力がたとえば次のように A_1, A_2 の形で得られたとしよう。

$$A(t_0; h) = \int_{t_0}^{t_0+h} \eta d\tau \quad (30)$$

$$A_1 = A(t_0; \Delta t/2), A_1 + A_2 = A(t_0; \Delta t)$$

ここで $A(t_0; h)$ が $A(t_0; 0) = 0$ を満たす h の2次多項式で近似できると仮定すれば、 $\eta(t_0), \dot{\eta}(t_0)$ は次のように書ける。

$$\eta(t_0) = \frac{3A_1 - A_2}{\Delta t}, \dot{\eta}(t_0) = \frac{4(A_2 - A_1)}{(\Delta t)^2} \quad (31)$$

4. あとがき

本報告では、ストラップダウン型慣性航法装置のソフトウェアのうち姿勢計算と航法計算(ノーススレーブ方式)のアルゴリズムをデジタルプロセッシングに適合した形で述べた。2.4節で述べたコーニング補正の方法は文献3)を参考にした。3節で述べたスカリング補正の方法はわれわれが考案したアルゴリズムであるが、その実用的な効果については今後シミュレーション等により検討していかなければならない。

本研究を行うにあたり、終始ご指導をいただいた防衛庁技術研究本部穂坂三四郎氏に深謝します。

参考文献

- 1) 特集 航空機の慣性航法装置, 日本航空宇宙学会誌, 31 (1983), pp. 275-315.
- 2) 中神浩一ほか: ストラップダウン型慣性装置について, 第1回宇宙航空の誘導制御シンポジウム資料, 1984.11, pp. 137-143.
- 3) Miller, R. B.: Strapdown Inertial Navigation Systems, AD-A112256 (1980.10).

一特 集一

音叉形振動ジャイロについて^{*1}

佐 藤 一 輝^{*2}

Key Words: Avionics, Guidance and Control, Gyro, Vibratory Gyro

1. はじめに

航空機, 船舶および各種自動機器の姿勢角の検出用または姿勢制御用のセンサとして各種のジャイロが使用されている。これらに使用されるジャイロは, 高速

で回転するロータの角運動量を利用して, 角速度または角度を計測するものである。

近年, リングレーザジャイロに代表される回転体をもたないジャイロが開発, 実用化されているが, 振動ジャイロもまた振動体の角運動量を利用するため, 回転体をもたないという特徴を有している。このため振動ジャイロは

- 1) 軸受などの摩耗部分がないため長寿命である。
- 2) 起動時間が短い。

^{*1} 昭和60年10月21日, 第23回飛行機シンポジウムにて講演。昭和62年2月21日原稿受理 Tuning Fork Vibratory Gyro

^{*2} (株)東京計器研究開発センター Kazuteru SATO

著者紹介

佐藤 一輝

昭和23年生。昭和45年埼玉大学理工学部機械工学科卒業。昭和50年京都大学大学院博士課程終了。昭和51年(株)東京計器入社、現在に至る。ジャイロおよびジャイロ応用機器の研究、開発に従事。工学博士。機械学会、潤滑学会各会員。

- 3) 低消費電力である。
- 4) 構造が簡単であり、安価である。
- 5) 特殊交流電源を必要とせず、電源、角速度出力ともに直流である。

等の利点をもっている。

振動体として音叉を用いた振動ジャイロは、“Gyrotron”という名称で、1950年代にSperry社により開発された¹⁾が、音叉の駆動およびジャイロ信号の検出が電磁式であったため、形状が大きかつ消費電力が大きいという欠点を有していた。これに対し、本文で紹介する2種類の振動ジャイロは、ジャイロ信号の検出系を曲げ振動系とし、音叉の駆動および変位の検出に圧電素子を用いたものであり、小型化、低消費電力化が図られたものである。

2. 動作原理

第1図に示すように、先端に $M/2$ なる質量を有する音叉を、音叉根元部でトーションバーにより支持した系を考えるものとする (“Gyrotron” のモデルに対応)。

音叉は Y 軸方向に速度 $\dot{r}$ で振動しており、 Z 軸方向に一定の角速度 Ω が入力するものとする。

力学の法則により「運動座標系が慣性座標系に対して一様な回転運動を行う場合、運動座標系に対して速

第1図 音叉形振動ジャイロのモデル

度 V をもつ物体には、コリオリの力 $-2m\Omega \times V$ が作用する」という原理があるので、この法則を第1図の系に適用すると、音叉の各質点の速度ベクトルの方向は互いに反対であるから、上記の法則により作用するコリオリの力 F_c は、第1図に示すように互いに反対方向に作用する。このためトーションバーは、コリオリの力による偶力のためねじられることとなり、このねじりトルク T は

$$T = 2rF_c = -2r\dot{r}M\Omega \quad (1)$$

と書ける。

いま、音叉の変位 r を

$$r = R + \Delta R \sin(\omega t) \quad (2)$$

とおくと (R : 音叉の中立位置のアーム幅, ΔR : 音叉の振動振幅, ω : 音叉の振動角速度), 式(2)を式(1)に代入して、2倍波の項を無視すると、

$$T = -2MR \cdot \Delta R \cdot \omega \Omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

となる。

したがって、式(3)のトルクが上述のねじり振動系に作用するから、系の運動方程式は、

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = T \quad (4)$$

となる。ここで、 I : Z 軸まわりの慣性モーメント、 C : 減衰係数、 K : トーションバーのねじりばね定数、 θ : トーションバーのねじり角である。

式(4)の定常解は、 ϕ を位相角として

$$\theta = \frac{-2MR \cdot \Delta R \cdot \omega \Omega}{\sqrt{(K - \omega^2 I)^2 + C^2 \omega^2}} \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

となる。

式(5)によれば、トーションバーのねじり角 θ は、音叉の周波数により変調されてはいるものの、入力角速度 Ω に比例することがわかる。それゆえ θ の絶対値を検出することによって Ω を知ることができる。これが振動ジャイロの動作原理である。

また、式(5)は、 $K = \omega^2 I$, すなわち、音叉の駆動周波数とトーションバー系の共振点とを一致させると、 θ は最大値をとり、

$$\theta = \frac{2MR \cdot \Delta R}{C} \cdot \Omega \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

となる。これは、ジャイロ信号の最大検出感度の条件を表している。

3. 振動ジャイロの構造および特性

第2図に振動ジャイロ TFG-60X のセンサ部の構造図を示す。

センサ本体は、一端がケースに固定された板ばねの他端よりのびたアームにより音叉をつり下げる構造となっている。また加速度による誤差を取り除くため、音叉をケースの中央部に配し、重心位置が音叉の中心

第2図 TFG-60X のセンサ部構造図

第3図 TFG-60X のセンサ部断面図

軸と一致するようなカウンタウェイトが設けられている。音叉の腕部には、左右各2枚の圧電素子が接着されており、音叉の駆動系を構成している。また、板ばねにも圧電素子が接着されており、角速度信号の検出に用いられている。上記構造のセンサ本体をケースに入れて密封し、防振ゴムにより外部振動の絶縁および音叉の振動が外部に伝達されないように構成したものがTFG-60Xのセンサ部である。

第3図は、上記構造のジャイロに、入力軸方向に角速度が入力した場合の板ばねの変形を示す図であり、第2図の入力軸方向からみたセンサ本体の断面図である。

音叉の速度ベクトルの方向が互いに外向きである瞬間において、ジャイロに角速度が入力すると、音叉に作用するコリオリの力は各質点で互いに逆方向となるから、コリオリの力による偶力が発生する。この偶力は、板ばねに対しては曲げモーメントとして作用するから、第3図に示すように板ばねは変形する。また第3図とは異なり、音叉の速度ベクトルの方向が互いに内向きである瞬間においては、コリオリの力の向きが異なり、第3図と反対の方向に板ばねは変形する。すなわち、板ばねは音叉の駆動周波数で変調された振動を行う。この振動を板ばねに接着した圧電素子により検出すれば入力した角速度を知ることができる。このように、角速度検出系の構成を板ばねによる曲げ振動系とした点、および音叉の駆動、変位の検出をすべて

第4図 振動ジャイロの構成

第5図 音叉共振特性

圧電素子とした点が本ジャイロの特徴である。

センサ部は上述のような構造、原理であるが、ジャイロとしては、第4図に示すように、音叉駆動回路およびデモジュレータ回路の両回路が必要である。

音叉駆動回路は、音叉の1次の共振周波数で、一定速度で音叉を駆動するための回路であり、音叉の腕部に設けた音叉変位検出用圧電素子および駆動用圧電素子とで閉ループを構成している。この理由は、ジャイロのスケールファクタを一定に保つためであり、このためには、式(5)で示したように、角速度信号の出力感度 θ/Ω 中に含まれる音叉の速度等を一定にしなければならないからである。

また、角速度信号は音叉の周波数の振幅信号として得られるから、角速度を直流電圧で出力するためには音叉駆動回路からの基準信号により同期整流をする必要がある。このための回路がデモジュレータ回路である。回転体の角運動量を利用するレートジャイロにおいては、本回路は付加されておらず、ユーザ側でこの回路を用意する必要があったが、振動ジャイロでは内蔵されており、使いやすいジャイロとなっている。

第5図は、TFG-60Xの音叉振動系の共振特性を測

第6図 入力角速度に対するジャイロの検出誤差 ($\pm 50^\circ/\text{s}$) 第7図 入力角速度に対するジャイロの検出誤差 ($\pm 1^\circ/\text{s}$)

定したものである。測定にあたっては、駆動系をオープンループとし、音叉に接着した駆動用圧電素子を外部電源により駆動し、変位検出用圧電素子で変位電圧を検出したもので、共振点の振幅は音叉変位 $2\ \mu\text{m p-p}$ に相当している。第5図の測定結果から、音叉の共振周波数は $597.4\ \text{Hz}$ 、減衰係数比は 5×10^{-4} ということがわかる。このように減衰係数比を小さくする理由は、駆動系の駆動能率向上のためであり、小さな電圧で大振幅の振動が得られるからである。

一方、板ばね系の共振周波数は、約 $512\ \text{Hz}$ であり、音叉の共振周波数よりも約 15% 低い値に設定されている。これは、式(6)に示した検出感度最大の条件とは一致しておらず、検出感度を低下させて使用しているということができる。この理由は、音叉の共振周波数と板ばねの共振周波数とを一致させた場合、温度等によりばね定数等が変化し、両者の共振周波数に差が生じたときに検出感度の変化率が最大となり、スケールファクタの変動が大きくなるからである。このように本ジャイロにおいては、検出感度を低下させても、その変化率を低くするよう配慮されている。

第6図および第7図は、ジャイロの検出誤差を測定した一例である。

第6図の測定は、ジャイロに $+50^\circ/\text{s}$ ($1^\circ/\text{s} = 0.0175\ \text{rad/s}$) の角速度を入力し、 $5^\circ/\text{s}$ ステップで $-50^\circ/\text{s}$ まで入力角速度を減少させ、再度 $5^\circ/\text{s}$ ステップで $+50^\circ/\text{s}$ まで入力角速度を増加させたときの入力角速度に対するジャイロ出力の検出誤差 (ジャイロ出力と入力角速度の差から入力角速度がゼロのときの残留出力値 (バイアス値) を引いた値) を示したものである。

第8図 TFG-160のセンサ部構造図

第9図 TFG-160のセンサ部断面図

また第7図は、最大入力角速度を $\pm 1^\circ/\text{s}$ として上記と同様な方法により $0.1^\circ/\text{s}$ ステップで測定したものである。検出誤差が小さいほど分解能の良いジャイロということができるが、本ジャイロの場合、 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ から $\pm 50^\circ/\text{s}$ にわたって入力角速度には関係なく、検出誤差は最大 $\pm 0.01^\circ/\text{s}$ であるということができる。なお、ジャイロの最大入力角速度は $\pm 200^\circ/\text{s}$ であるが、この範囲においては、上記検出誤差は同一である。

つぎに、音叉形振動ジャイロの他の例として、角速度信号の検出系を両端支持構造の板ばねとした TFG-160 について述べる。

第8図に TFG-160 の構造図を示す。第2図で示した TFG-60X と類似しているが、相異点は、板ばねの支持をケースの両端で行ったことおよび音叉を板ばね中央で固定したことである。この結果、幾何学的中心と重心とが一致し、アームおよびカウンターウェイト等の付属部品を排除することができ、部品点数の削減を達成している。

第9図は、第3図と同様、ジャイロに角速度入力がある場合の板ばねの変形を表す TFG-160 センサ本体の断面図である。板ばねを両端支持構造としたため、音叉に作用するコリオリの力による偶力は、板ばね中心に作用する曲げモーメントと等価となり、板ばねの変形は S 字状となる。この変形モードが TFG-60X とは大きく異なる点であり、このため圧電素子の接着

第1表 振動ジャイロ主要性能表

項 目	TFG-60 X	TFG-160
測定範囲(°/s)	±200	±200
スケールファクタ (mV/(°/s))	50	50
分解能(°/s)	0.02	0.02
リニアリティ(%)	0.2	0.2
周波数特性(Hz)	20	50
起動時間(s)	1	1
出力信号	アナログ直流電圧	アナログ直流電圧
出力インピーダンス (Ω)	1000	100
使用温度範囲(°C)	0~60	-10~70
所要電源	{ +15 V 20 mA -15 V 25 mA	+15 V 10 mA -15 V 10 mA
外形寸法(mm)	90×65×40	50×55×32
質量(g)	260	125

第2表 振動ジャイロ/レートジャイロの比較

項 目	レートジャイロ	振動ジャイロ
測定範囲	○	○
分解能	○	○
リニアリティ	△	○
バイアスの安定性	○	△
耐環境性	○	△
ジャイロ出力	交流	直流
使用電源	{ モータ電源 ピックアップ電源	直流±15 V
寿命	×	○
コスト	×	○

○:優れている, △:やや劣る, ×:劣っている

位置が変更となっている。

なお回路部の構成は、TFG-160も第4図と同様である。

第1表に、振動ジャイロ TFG-60X および TFG-160 の主要性能表を示す。第1表からも明らかなように、両ジャイロとも、測定範囲±200°/s、分解能

0.02°/s、リニアリティ 0.2%と性能的には同一であるが、TFG-160は、周波数特性が 50 Hz と向上した点、および所要電源、外形寸法、質量が TFG-60X に比し約 1/2 になった点が異なっている。すなわち、TFG-160 は TFG-60X を小型化、低消費電力化を行ったものといえることができる。

4. レートジャイロとの比較

第2表に、高速回転体を有する通常のレートジャイロと振動ジャイロとの定性的な比較表を示す。

本表によれば、振動ジャイロの分解能、リニアリティ等の性能は、レートジャイロとほぼ同等または優れているものの、温度、振動等の耐環境性については若干劣るということができる。また振動ジャイロは、軸受等の摩耗部品がないため長寿命である点、特殊交流電源を必要とせず、電源および角速度出力ともに直流である点、構造が簡単であり、安価である点等レートジャイロにはない特長をもっている。このため、現有のレートジャイロの応用範囲はもとより、無人走行車、ロボット等に代表される自動機器用の運動センサとして、今後ますます応用されるものと思われる。

5. おわりに

音叉を振動体とした振動ジャイロの概略について解説を行ったが、今後、高性能化、小型化、低コスト化をめざしてさらに改良研究が行われるものと思われる。本文が振動ジャイロを理解するうえで、その一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Barnaby, R. E., Chatterson, J. B. and Gerring, F. H.: General Theory and Operational Characteristics of the Gyrotron Angular Rate Tachometer, Aeronautical Engineering Review, 12, 11 (1953), pp. 31-36.